Teoría del Residuo Termodinámico - Cosmología Viscosa (TRT-VC)

Un Modelo de Energía Oscura como Disipación del Espacio-tiempo

Dr. Carlos David Bianco Moreno

C.I.: 17.570.016

carlosdavid1985@hotmail.es

Venezuela 08/12/2025

1. Introducción: Más Allá de la Constante Cosmológica

El paradigma ΛCDM, si bien exitoso en su ajuste a los datos observacionales, se enfrenta a una profunda crisis teórica. La energía oscura, modelada como una constante cosmológica (Λ), presenta una desconcertante dualidad: por un lado, su valor observado es increíblemente pequeño en comparación con las predicciones de la teoría cuántica de campos (el problema del ajuste fino); por otro, su valor actual es comparable a la densidad de energía de la materia, una coincidencia temporal que carece de explicación (el problema de la coincidencia).

La **Teoría del Residuo Termodinámico - Cosmología Viscosa (TRT-VC)** se presenta como una alternativa elegante y económicamente parsimoniosa. En lugar de postular nuevas partículas o campos exóticos, la TRT-VC propone que la energía oscura es el resultado de una propiedad fundamental y hasta ahora desatendida del universo: una **viscosidad de volumen no nula del espacio-tiempo**.

En esta visión, el universo a gran escala se comporta como un fluido cósmico. Al igual que un fluido viscoso disipa energía cinética en calor debido a la fricción interna, la expansión del universo a través de un espacio-tiempo "viscoso" disipa la energía de la materia y la radiación. Este "calor" no es radiación térmica, sino un aumento directo en la densidad de energía del vacío. La energía oscura, por tanto, no es una sustancia misteriosa, sino el **residuo termodinámico de la expansión cósmica**. Este mecanismo dinámico ofrece una solución natural al problema de la coincidencia y sitúa el origen de la aceleración cósmica dentro del marco bien establecido de la Relatividad General y la termodinámica de fluidos relativistas.

2. Explicación Detallada del Modelo

El pilar de la TRT-VC es la reinterpretación del contenido energético del universo y su dinámica.

El Fluido Cósmico y la Viscosidad:

A escalas cosmológicas, el universo es homogéneo e isótropo, y puede ser descrito eficazmente como un fluido perfecto con una densidad de energía **ρ** y una presión **p**. En el modelo estándar, este fluido es no viscoso, lo que implica la conservación local de su energía-momento.

La TRT-VC postula que este fluido cósmico no es perfecto, sino que posee una **viscosidad de volumen (bulk viscosity)**, denotada por **ζ**. La viscosidad de volumen se manifiesta en cambios de volumen y es la única forma de viscosidad compatible con la simetría espacial homogénea del universo.

El Mecanismo de "Residuo por Disipación":

1. **Expansión y Fricción:** A medida que el universo se expande (**$H > 0$**), el fluido cósmico se estira. Si el espaciotiempo tiene una viscosidad de volumen **$\zeta > 0$**, esta expansión no es un proceso libre de fricción. Se genera una presión viscosa negativa, **$p_{visc} = -3\zeta H$**.
2. **Transferencia de Energía:** Esta presión viscosa realiza un trabajo sobre el sistema. En lugar de convertir la energía en movimiento térmico a nivel microscópico (que ya está en equilibrio), la TRT-VC postula que esta energía disipada se transfiere directamente al sector gravitacional-vacuo. La energía no se destruye, sino que cambia de forma: de energía de la materia/radiación a energía del vacío.
3. **Creación de Energía Oscura:** El resultado neto es una **creación efectiva de energía oscura** a partir de los otros componentes. La tasa de creación es proporcional a la tasa de expansión (**H**) y a la magnitud de la viscosidad (**ζ**).
4. **El Enfriamiento del Cosmos:** A medida que el universo se expande, la densidad de materia **ρ_m** disminuye. Proponemos que la viscosidad del espacio-tiempo no es una constante intrínseca, sino una **respuesta a la presencia de materia**. Por lo tanto, **ζ** disminuye a medida que **ρ_m** disminuye. La "fricción" se vuelve menos eficiente, la tasa de generación de energía oscura se reduce, y la expansión acelerada eventualmente se desacelerará, llevando a un universo que se enfría y se asintóticamente se detiene.

3. Formalismo Matemático

El formalismo de la TRT-VC se construye directamente sobre las ecuaciones de campo de Einstein, pero con un tensor de energía-momento modificado para incluir la viscosidad.

A. Ecuaciones de Einstein:

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G \, T_{\mu\nu}^{total}$$

La clave es la estructura de **$T_{\mu\nu}^{total}$**. Para un fluido viscoso, el tensor de energía-momento en el marco de descanso cósmico es: **$T_{\mu}^{\nu\, total} = \mathrm{diag}(-\rho_{total}, p_{total} + p_{visc}, p_{total} + p_{visc}, p_{total} + p_{visc})$**

Donde **$\rho_{total} = \rho_m + \rho_r + \rho_{DE}$** y **$p_{total} = p_m + p_r + p_{DE}$**. La presión viscosa isotrópica es: **$p_{visc} = -3\zeta H$**

Aquí, **ζ** es el coeficiente de viscosidad de volumen. Para mantener la coherencia con la idea de que la viscosidad es una propiedad inducida por la materia, postulamos una ley lineal: **$\zeta = \zeta_0 \cdot \rho_m$** Donde **$\zeta_0$** es una constante fundamental del modelo con dimensiones de tiempo.

B. Ecuaciones de Friedmann Modificadas:

Las ecuaciones de Friedmann, que gobiernan la expansión, mantienen su forma pero con una presión efectiva **$p_{eff} = p_{total} + p_{visc}$**: **$H^2 = (8\pi G/3)\rho_{total} - k/a^2$ $\ddot{a}/a = -(4\pi G/3)(\rho_{total} + 3p_{eff}/c^2)$**

Sustituyendo **p_{eff}**: **$\ddot{a}/a = -(4\pi G/3)(\rho_{total} + 3p_{total}/c^2 - 9\zeta H/c^2)$**

El término **$- (12\pi G\zeta H/c^2)$** es un término de repulsión que puede conducir a la aceleración si es lo suficientemente grande.

C. Ecuaciones de Continuidad (Conservación de Energía):

La ley de conservación de la energía-momento total se mantiene: **$\nabla_\mu T^{\mu\nu\ total} = 0$**. Sin embargo, esto no implica la conservación de cada componente por separado. La energía fluye desde la materia hacia la energía oscura.

La ecuación de continuidad general es: **$d\rho_{total}/dt + 3H(\rho_{total} + p_{eff}/c^2) = 0$**

Para separar los componentes, definimos una tasa de transferencia de energía **Q** desde la materia hacia la energía oscura. La energía disipada por unidad de volumen y tiempo debido a la viscosidad es: **$Q = 3\zeta H^2 = 3\zeta_0\ \rho_m H^2$**

Las ecuaciones de continuidad modificadas son: **$d\rho_m/dt + 3H\rho_m = -Q$** (La materia pierde energía) **$d\rho_{DE}/dt + 3H(\rho_{DE} + p_{DE}/c^2) = +Q$** (La energía oscura gana energía)

Asumimos que la energía oscura se comporta como un vacío (**$p_{DE} = -\rho_{DE}\ c^2$**), por lo que su ecuación se simplifica a: **$d\rho_{DE}/dt = +Q = 3\zeta_0\ \rho_m H^2$**

Este sistema de ecuaciones es matemáticamente coherente y cerrado. Describe un universo donde la materia se diluye ligeramente más rápido que **a^{-3}** debido a la pérdida de energía, y la energía oscura se genera dinámicamente.

D. Solución y Comportamiento:

La solución de este sistema acoplado requiere métodos numéricos en general. Sin embargo, podemos analizar el comportamiento:

- **Épocas Tempranas: ρ_m** es muy grande. La fuente **Q** es potente, pero la densidad de materia **ρ_m** domina la dinámica, y el universo está en una fase dominada por materia, en desaceleración.
- **Época de Transición:** A medida que **ρ_m** cae como **a^{-3}** (modificado por **Q**), la energía oscura **ρ_DE** se acumula. Llega un punto en que **ρ_DE** comienza a dominar sobre **ρ_m**. Esto es la transición a la aceleración.
- **Época Tardía: ρ_m** es muy pequeña. La fuente **Q** se vuelve casi nula. La energía oscura se comporta como una constante cosmológica (**dρ_DE/dt ≈ 0**), y el universo entra en una expansión exponencial.

Este comportamiento reproduce cualitativamente la historia del universo observado y, crucialmente, explica por qué la transición ocurrió "ahora": es el resultado inevitable de la acumulación de **ρ_DE** a loargo del tiempo.

4. Comparación con Otras Teorías

- **ΛCDM:** La TRT-VC se reduce a ΛCDM en el límite **ζ_0 → 0**. La diferencia fundamental es que en ΛCDM, **ρ_DE** es una constante primordial, mientras que en TRT-VC, **ρ_DE** es cero inicialmente y crece hasta su valor actual. Esto ofrece una solución dinámica al problema de la coincidencia.
- **Quintessencia:** Ambos modelos tienen una energía oscura dinámica. Sin embargo, la quintessencia introduce un campo escalar fundamental con un potencial. La TRT-VC es ontológicamente más simple: no requiere nuevos campos, solo una nueva propiedad del espacio-tiempo o del fluido cósmico. Es una modificación "macroscópica" en lugar de "microscópica".
- **TRT-C (Modelo Cuántico):** Ambas teorías comparten la misma idea central de una transferencia de energía. La diferencia radica en el mecanismo:
  - **TRT-C:** Propone un acoplamiento fundamental a nivel de Teoría Cuántica de Campos (un nuevo campo **ϕ** y una constante **g**). Es una teoría "bottom-up".
  - **TRT-VC:** Propone una propiedad termodinámica emergente del espacio-tiempo (viscosidad **ζ**). Es una teoría "top-down". La TRT-VC es más conservadora al no postular nuevas entidades, pero su principal debilidad es que no explica el origen microfísico de la viscosidad, mientras que la TRT-C sí lo intenta (aunque con el costo de un ajuste fino extremo).

5. Conclusión y Vías de Contrastación

La **Teoría del Residuo Termodinámico - Cosmología Viscosa (TRT-VC)** establece un marco coherente y matemáticamente riguroso para la energía oscura. Al postular una viscosidad de volumen del espacio-tiempo, transforma la energía oscura de un misterio estático a una consecuencia dinámica y termodinámica de la evolución cósmica.

Fortalezas del Modelo:

1. **Parsimonia Ontológica:** No requiere la introducción de nuevos campos o partículas, extendiendo la Relatividad General con un concepto (viscosidad) bien conocido en la física de fluidos.
2. **Solución al Problema de la Coincidencia:** Proporciona un mecanismo natural que explica por qué la energía oscura se vuelve dominante en la época actual.
3. **Coherencia Matemática:** El modelo se deriva de forma consistente de las ecuaciones de Einstein con un tensor de energía-momento modificado, un enfoque estándar en la cosmología de fluidos relativistas.

Desafíos y Contrastación:

El principal desafío de la TRT-VC es la falta de una teoría fundamental subyacente que explique por qué el espacio-tiempo debería tener esta viscosidad. Es, en esencia, un modelo fenomenológico.

Sin embargo, el modelo es **falsable**. Predice una historia de la expansión del universo (**$H(z)$**) y una tasa de crecimiento de estructuras que difieren sutilmente del ΛCDM. El parámetro clave, **ζ_0**, puede ser restringido por observaciones de alta precisión de:

- **Fondo Cósmico de Microondas (CMB):** Afecta la distancia al último plano de dispersión.
- **Oscilaciones Acústicas de Bariones (BAO):** Mapean la historia de la expansión.
- **Supernovas Tipo Ia (SNIa):** Son indicadores de distancia estándar.
- **Crecimiento de Estructuras:** La disipación de energía afecta cómo las galaxias y cúmulos se agregan.

Encuestas cosmológicas de próxima generación como Euclid, el Vera C. Rubin Observatory (LSST) y DESI están diseñadas precisamente para medir estas desviaciones. Si se encontrara evidencia de una interacción materia-energía oscura con la forma **$Q \propto \rho_m H^2$**, la TRT-VC se convertiría en una de las explicaciones más atractivas y parsimoniosas para el destino acelerado de nuestro universo.